

文章编号:1001-4179(2013)20-0046-04

水工混凝土氯离子侵蚀模拟的相似性研究

高延红¹, 庄华夏¹, 李西宗², 伍亚玲¹, 刘如泰¹

(1. 浙江工业大学 建筑工程学院, 浙江 杭州 310014; 2. 浙江省温州市温瑞塘河水系管理局, 浙江 温州 325000)

摘要:以典型海洋环境下温州市瓯江口一座既有水闸为背景,分析了处于潮差区的闸墩混凝土氯离子侵蚀参数,将其与室内模拟加速试验结果相比较,研究在人工气候环境下水工混凝土氯离子侵蚀参数的相似性。根据测定的混凝土不同深度处自由氯离子浓度,分析了既有闸墩混凝土的对流区厚度、氯离子浓度峰值,计算了混凝土的氯离子扩散系数;对比分析了人工气候环境与模拟环境中主要参数的相似性。分析结果表明,人工气候环境侵蚀试验中,氯离子对流区厚度和混凝土扩散系数等重要参数与自然环境下的侵蚀有相似规律。

关键词:氯离子; 模拟试验; 相似性; 水工混凝土; 海洋环境

中图分类号: TV431 **文献标志码:** A

混凝土耐久性研究的常用试验方法包括真实试验法和模拟试验法。真实试验法是对现场真实环境中的结构构件进行试验,它包括现场检测试验、暴露试验和替换构件试验等。模拟试验法是采用各种人工的方法对钢筋混凝土构件进行耐久性性能的加速退化,当达到所需的退化程度后,即可进行耐久性试验^[1]。模拟试验法为相似理论的运用,但目前的模拟试验大多是根据经验方法设计,缺乏相应的理论指导^[1-2]。实际上,自然海洋环境下的混凝土结构,不仅承受氯盐侵蚀,还受潮水冲刷和荷载作用等其它因素的影响,室内试验是很难模拟这些自然环境因素共同作用下的氯离子侵蚀过程^[3-4]。因此,分析已有混凝土构件的氯离子侵蚀特征、侵蚀参数及抗侵蚀性能等,是自然海洋环境下混凝土结构耐久性研究的重要手段。

本文以浙江省温州市瓯江口一座处于海洋环境下的既有水闸为背景,研究了处于潮差区的闸墩混凝土氯离子侵蚀参数,在取得该水闸闸墩不同深度处混凝土样品的自由氯离子浓度基础上,分析了运行15 a的闸墩混凝土氯离子侵蚀的对流区厚度、峰值氯离子浓度和氯离子浓度分布类型等,并计算了该闸墩混凝土的扩散系数。根据人工气候干湿循环环境下的模拟试验结果,研究了侵蚀参数的相似性。研究结论可为在

室内模拟海洋环境下水工混凝土氯盐侵蚀的耐久性试验设计提供参考。

1 海洋环境下水工混凝土氯离子侵蚀参数

1.1 工程概况与混凝土取样

取样位置位于温州龙湾扶贫开发区瓯江口的临海水闸,距河流的入海口为1 km,1998年4月建成投入运行。该闸的特点是过闸水体化学污染严重,水体及河床土体均变黑,主要是由于开发区内皮革、铁钉厂(作坊)排出大量污水所致。水闸为1孔,净宽5.0 m,钢闸门;设计过流流量为50.2 m³/s,闸底板高程(吴淞高程)1.48 m。总体来看,混凝土情况尚好,过水潮差区有骨料外露,见图1。

2012年12月取得该水闸闸墩混凝土芯样10个。取样位置均在闸墩下部,以闸门槽为界,上、下游各取5个芯样;高度距离闸底板77~180 cm。混凝土芯样直径6 cm,长度为10~20 cm不等。取得芯样的位置见图2,其中部分芯样的表面冲刷剥蚀严重、骨料外露。

根据该水闸的施工竣工验收资料,此水闸闸墩混凝土的配合比为:水泥:水:砂:骨料=1.00:0.53:2.00:3.88。本文参考文献[5]的方法,对所取得的闸墩混

收稿日期:2013-03-16;修回日期:2013-04-28

基金项目:国家自然科学基金项目(5129181,50879079)

作者简介:高延红,女,副教授,硕士,主要从事混凝土耐久性方面的研究。E-mail:zhonggaoyun@sina.com

凝土水灰比进行推定。根据推定结果,上游 3 号芯样两组混凝土分别为:水泥:水 = 1.00:0.57,水泥:水 = 1.00:0.53。下游 4 号芯样两组混凝土分别为:水泥:水 = 1.00:0.54,水泥:水 = 1.00:0.57。取 4 组混凝土的平均值,则该水闸闸墩混凝土的水灰比为 0.56。施工竣工验收时的水灰比为 0.53,两者较为接近。



图 1 既有临海混凝土水闸工程

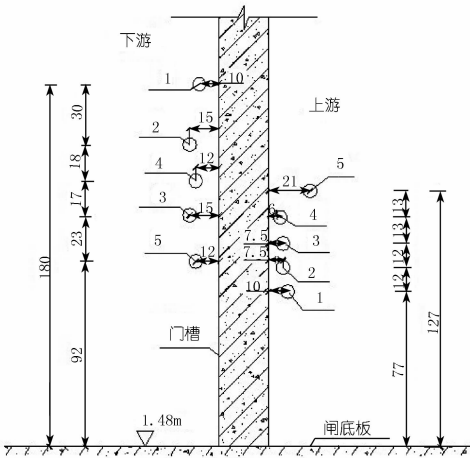


图 2 水闸闸墩混凝土芯样的取样位置(尺寸单位:cm)

1.2 水工混凝土氯离子浓度分布

将取得的混凝土用 HDM-150 混凝土研磨机,按 2 mm 厚度的规格从混凝土表面一侧逐步向内侧研磨成粉末,直到芯样磨至距离外表面至少 30 mm 结束,并过 0.63 mm 水泥筛后收集,每一个芯样取至少 15 个不同深度处的氯离子浓度值。混凝土中自由氯离子浓度(自由氯离子占混凝土的质量百分数)利用美国 THERMO Orion DUAL Star PH/离子浓度测量仪测定^[3]。测得混凝土中的自由氯离子浓度分布如图 3 所示。

由图 3 可见,闸门下游混凝土中自由氯离子浓度总体上比上游混凝土中的要高,主要原因是下游环境水体中的氯离子浓度比上游高。

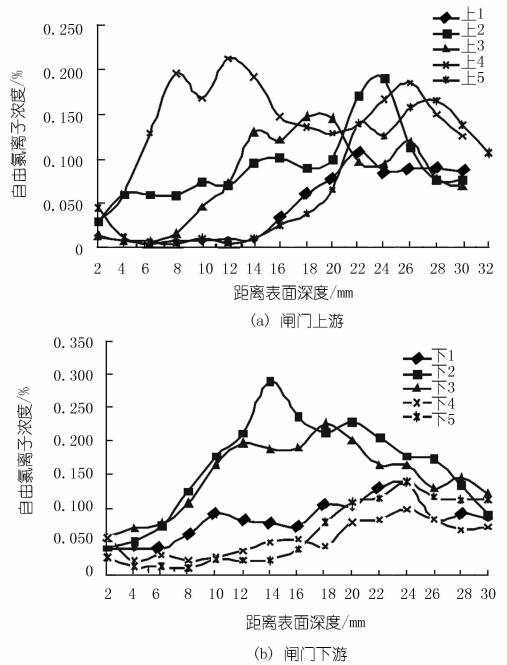


图 3 混凝土中自由氯离子浓度

1.3 水工混凝土氯离子侵蚀的主要参数

混凝土氯离子侵蚀的对流区厚度,一般是指混凝土中氯离子峰值浓度之前外侧的厚度^[1-2]。因此,根据测定的自由氯离子浓度,可得该水闸闸墩潮差区的混凝土氯离子侵蚀的对流区厚度,见表 1。

表 1 闸墩潮差区混凝土氯离子侵蚀对流区厚度 mm

编号	闸门上游	闸门下游	编号	闸门上游	闸门下游
1	22	24	4	26	24
2	24	20	5	22	24
3	18	18			

按表 1 统计,闸门上游混凝土的对流区厚度平均值为 22.4 mm,下游为 22.0 mm。测定的混凝土中最高自由氯离子浓度,即自由氯离子浓度峰值见表 2。

表 2 闸墩潮差区混凝土自由氯离子浓度峰值 %

编号	闸门上游	闸门下游	编号	闸门上游	闸门下游
1	0.1093	0.1366	4	0.186026	0.109324
2	0.1897	0.2287	5	0.0987	0.1366
3	0.1481	0.2256			

按表 2 结果,闸门上游混凝土中自由氯离子浓度峰值的平均值为 0.160 0%,下游为 0.165 5%。下游混凝土中自由氯离子浓度峰值也比上游混凝土中的峰值要高。

氯离子在混凝土内部的扩散符合 Fick 第二定律,则该水闸闸墩混凝土氯离子侵蚀可用扩散方程表示

为^[2]：

$$C_{x,t} = C_0 + (C_s - C_0) \left[1 - \operatorname{erf} \left(\frac{x}{2\sqrt{Dt}} \right) \right] \quad (1)$$

式中, $C_{x,t}$ 为 t 时刻 x 深度处的氯离子浓度, %; C_0 为初始氯离子浓度, %; C_s 为混凝土表面氯离子浓度, %; D 为混凝土的有效扩散系数, m^2/s ; $\operatorname{erf}()$ 为误差函数,

$$\operatorname{erf}(x) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^x e^{-t^2} dt$$

从该水闸投入使用到取芯样时已运行 5 300 d, 方程(1)中的侵蚀时间为 $t = 5\,300 \times 24 \times 3\,600 = 4.592 \times 10^8 \text{ s}$ 。再根据测得的自由氯离子浓度, 以上述方程为依据用最小二乘法拟合混凝土扩散系数, 即将每个混凝土芯样各深度处的坐标值 ($x, C_{x,t}$) 代入式(1)。由于氯离子在混凝土表面并不符合扩散规律, 故排除对流区数据, 以稳定扩散区的最高氯离子浓度处作为扩散表面, 要求拟合相关度 R^2 尽可能接近 1 作为拟合优度的检验, 拟合以下方程^[2,6]

$$C_{x,t} = C_0 + (C_1 - C_0) \left[1 - \operatorname{erf} \left(\frac{x - X_1}{2\sqrt{Dt}} \right) \right] \quad (2)$$

式中, C_1 为对流区与扩散区界面处的自由氯离子浓度, 即峰值浓度, %; X_1 为对流区厚度, mm。

拟合的各芯样混凝土的氯离子扩散系数如表 3。

表 3 闸墩潮差区混凝土的氯离子扩散系数 $10^{-13} \text{ m}^2/\text{s}$

编号	闸门上游	闸门下游	编号	闸门上游	闸门下游
1	3.25	1.92	4	1.43	2.61
2	0.05	5.22	5	1.28	8.99
3	2.80	3.24			

除闸门上游 2 号混凝土外, 其它的部位混凝土拟合相关度 R^2 均大于 0.90。按表 3 的计算结果统计, 闸门上游混凝土的氯离子扩散系数平均值为 $1.76 \times 10^{-13} \text{ m}^2/\text{s}$, 下游的为 $4.40 \times 10^{-13} \text{ m}^2/\text{s}$ 。上述结果是可信的, 与文献[2]中同样侵蚀时间下混凝土扩散系数在数量级吻合。下游扩散系数较上游稍大, 主要是因为下游混凝土所处环境的氯离子浓度比上游的要大, 且取芯的位置比上游要高, 水位变化频繁, 使其干燥的时间更长。

2 人工环境下混凝土氯离子侵蚀试验

2.1 试验方法与原材料

人工气候环境的腐蚀模拟试验, 是以自然环境与各种工业环境为背景, 设计人工气候参数, 通过气候环境模拟装置形成一个加速侵蚀的人工气候环境, 以达到对建筑材料与结构进行耐久性能加速试验的目的。

本文所述的模拟试验设备是人工大气模拟气候试验室 (ZHS-028)^[7]。试验模拟主要考虑温度和湿度因素, 设置了 4 个环境条件, 见表 4。

表 4 模拟气候环境设计参数 (温度与湿度)^[7]

环境条件	温度/ ℃	相对湿度/ %	环境条件	温度/ ℃	相对湿度/ %
条件 1 (春)	34	78	条件 3 (秋)	34	80
条件 2 (夏)	53	80	条件 4 (冬)	12	75

试验中采用浓度为 5 % NaCl 的盐雾从上部向下喷洒, 以达到加速腐蚀的效果。为模拟潮水位波动特征, 设置的喷雾腐蚀时间为 2 h, 干燥腐蚀时间为 46 h。按照表 4 中的环境因素依次循环, 经历 4 个气候环境后为一个大气循环周期 (8 d, 即相当于自然环境腐蚀的时间 1 a)。

试验采用钱潮牌 32.5 普通硅酸盐水泥, 粗骨料为最大粒径为 40 mm 的砾石, 细骨料为细度模数为 2.2 的中细河砂, 拌和水和养护水为杭州当地自来水。本文以接近上述既有水闸闸墩混凝土 (水灰比 0.56) 的试件 (水灰比 0.55) 为例进行分析, 试验混凝土的配合比为水泥: 水: 砂: 粗骨料 = 1.00: 0.55: 1.67: 3.55, 与上述既有水闸的闸墩混凝土配合比组分接近。根据混凝土配合比, 按相关规范^[8], 每组混凝土浇制 3 个 100 mm × 50 mm 的圆盘型试件。试件放在温度为 $20 \pm 2^\circ\text{C}$ 、相对湿度为 90% 的养护室中养护 28 d。养护完成后, 对试件侧面及底面均涂抹环氧树脂进行隔离, 试件上表面不涂抹环氧树脂, 将其作为腐蚀时氯离子的入侵面^[7]。

2.2 人工环境下混凝土氯离子侵蚀参数

试件进行了 5 个时间段 (40, 80, 120, 160 d 和 200 d) 的腐蚀试验。表 5 是水灰比 0.55 的混凝土腐蚀后的主要参数, 均为一组 3 个试件的平均值。对流区厚度、自由氯离子浓度测试和扩散系数计算方法同上。

表 5 人工气候环境下水工混凝土氯离子侵蚀的主要参数

腐蚀时间/ d	对流区厚度/ mm	氯离子浓度 峰值/%	扩散系数/ ($\times 10^{-12} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$)
40	3	0.3299	13.60
80	4	0.3539	9.40
120	5	0.3840	8.01
160	6	0.5343	6.84
200	6	0.6554	4.85

试验结果表明, 上述环境下的加速试验也出现了氯离子侵蚀的对流区。随着腐蚀时间的延长, 在设置的环境条件下, 氯离子对流区的厚度在 6 mm 左右, 混凝土中氯离子峰值浓度也在增加。随着腐蚀时间的增

加,混凝土氯离子扩散系数降低,这一现象符合混凝土氯离子扩散系数随时间增加而降低的一般规律^[9]。

3 模拟试验的参数相似性分析

3.1 对流区厚度及峰值浓度相似性

在上述测定的既有混凝土腐蚀试验的结果中,由于环境条件的不同,其氯离子侵蚀的对流区厚度是不同的。以 λ_1 表示试验与自然环境下氯离子侵蚀对流区厚度的相似率,则在本文所述的条件下,以 160 ~ 200 d 侵蚀试验的 6 mm 的情形,计算得 $\lambda_1 = 0.273$ 。之所以出现这种情况,主要是由于侵蚀试验的时间相对不长,侵蚀的深度并不大。随着侵蚀试验时间的延长,试验混凝土中自由氯离子浓度的峰值在增加。用 λ_2 表示试验与自然环境下氯离子浓度的相似率,以既有水闸闸墩混凝土的自由氯离子浓度峰值均值 0.162 8% 计算,则 40 ~ 200 d 共 5 个试验时间内的 λ_2 分别为 2.026, 2.174, 2.359, 3.282 和 4.026。由此,试验混凝土的氯离子浓度的峰值相似率是随着时间的延长而增加的。

3.2 混凝土扩散性能的相似性

随着侵蚀试验时间的延长,试验混凝土的氯离子扩散系数降低。用 λ_3 表示试验与自然环境下氯离子扩散系数的相似率,以既有水闸闸墩混凝土的氯离子扩散系数均值 $4.40 \times 10^{-13} \text{ m}^2/\text{s}$ 计算,则 40 ~ 200 d 共 5 个试验时间内的 λ_3 分别为 30.91, 21.36, 18.21, 15.55 和 11.02。试验混凝土的氯离子扩散系数相似率是随着时间的延长而减低的。因此,在本文所述的试验环境条件下,侵蚀 200 d 的试验混凝土样扩散系数与上述自然海洋环境条件混凝土扩散系数的相似率大致为 11。

Mangat 等将氯离子扩散系数随时间延长而降低的现象用幂函数表征^[9],得到时间为 t 时混凝土的氯离子扩散系数模型为:

$$D(t) = D_0(t_0/t)^m \quad (3)$$

式中, m 为经验系数,与水灰比有关^[5,8]; t_0 为混凝土养护龄期, d; D_0 为参考期(一般为 28 d)扩散系数, m^2/s 。

以试验混凝土(水灰比 0.55)养护 28 d、腐蚀 40 d 之后的氯离子扩散系数($13.60 \times 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$)为参考期的扩散系数,则可拟合得到水灰比 0.55 的试验混凝土氯离子扩散系数随时间的变化模型为(相关度 $R^2 = 0.950$)^[7]:

$$D(t) = 1.36 \times 10^{-11}(t_0/t)^{0.752} \quad (4)$$

以公式(4)计算,当 $t = 3\ 800$ d 时,试验混凝土的

氯离子扩散系数才降低到既有水闸下游闸墩混凝土的扩散系数($4.40 \times 10^{-13} \text{ m}^2/\text{s}$),而降低至上游闸墩混凝土的扩散系数($1.76 \times 10^{-13} \text{ m}^2/\text{s}$)的时间为 12 960 d。由此条件下的试验参数,则可推求既有混凝土的扩散系数随时间降低的规律,再以此计算混凝土中钢筋初锈时间和耐久性寿命等。

4 结论

本文以自然海洋环境下的既有水工混凝土为背景,研究了室内人工气候环境加速模拟试验侵蚀中主要参数的相似性,主要结论如下。

(1) 在主要侵蚀参数方面,人工气候环境下混凝土氯离子的加速侵蚀试验与天然海洋环境下的混凝土氯离子侵蚀有一定的相似规律,均出现了氯离子侵蚀的对流区。

(2) 由于环境条件不同,短期人工气候环境下的试验中,氯离子侵蚀的对流区厚度相似率为 0.273 左右;试验混凝土中氯离子的峰值浓度的相似率随试验时间延长而减小。

(3) 试验混凝土中氯离子扩散系数相似率也随试验时间延长而减小,有较好的相似规律。利用通过加速试验得到的氯离子扩散系数衰减规律,可以推求实际海洋环境下混凝土的扩散系数随时间降低的规律。在本文所述的试验环境条件下,侵蚀 200 d 的试验混凝土扩散系数的相似率大致为 11。

参考文献:

- [1] 卢振永. 氯盐腐蚀环境的人工模拟试验方法[D]. 杭州:浙江大学,2007.
- [2] 金伟良,袁迎曙,卫军,等. 氯盐环境下混凝土结构耐久性理论与设计方法[M]. 北京:科学出版社,2011:58-67.
- [3] 张俊芝,王建泽,孔德玉,等. 既有水工混凝土氯离子扩散系数的时变模型[J]. 水利水运工程学报,2010(6):14-20.
- [4] 张俊芝,王建泽,孔德玉,等. 水工混凝土氯离子侵蚀及扩散系数的随机模型[J]. 人民长江,2008,39(11):105-108.
- [5] 张俊芝,孔德玉,王建泽,等. 一种推定硬化混凝土配合比的方法[2009100989282][P]. 中华人民共和国发明专利,2010,12.
- [6] 郑辉. 自然环境下混凝土氯离子侵蚀的随机性及寿命预测[D]. 杭州:浙江工业大学,2009.
- [7] 周剑. 混凝土氯离子扩散性能影响因素的试验研究[D]. 杭州:浙江工业大学,2010.
- [8] SL352-2006. 水工混凝土试验规程[S]. 北京:中国水利水电出版社,2006.
- [9] Mangat P S, Molloy B T. Prediction of long term chloride concentration in concrete[J]. Materials and Structure, 1994, 27(6): 338-346.

(编辑:郑毅)

(下转第 53 页)

在溪洛渡高拱坝施工仿真系统中,利用 Visual Basic 2008 软件对 AutoCAD 进行二次开发,根据大坝各坝段的浇筑顺序及其对应的浇筑信息来三维动态显示大坝混凝土的浇筑过程。通过点击高拱坝施工仿真系统中的 CAD 三维可视化按钮,能够动态显示溪洛渡大坝的浇筑过程。本系统还增加了信息查询功能,当查询某浇筑块的浇筑信息时,直接点击该浇筑块或在坝块序号中输入坝块序号,则可直接看到该坝块的浇筑信息。

4 结语

通过描述施工仿真系统结构,建立了混凝土拱坝施工仿真模型,分析了混凝土拱坝施工仿真机制,构建了精细化的施工全过程仿真系统。通过 VB 对 AutoCAD 的二次开发,实现了大坝浇筑过程的三维显示及三维可视化信息管理与可视化查询。为充分描述施工全过程动态仿真三维面貌及信息,系统还可从任意角度局部放大三维施工仿真动态显示图。系统不仅能够形象生动地展示了溪洛渡水电站的各坝段混凝土施工

过程,同时还为施工决策提供了很大的帮助,为其他大型混凝土拱坝施工提供了借鉴。

参考文献:

- [1] 王进丰,郭清. 水利工程设计仿真系统及在施工中的应用[J]. 人民长江,2003,33(2).
- [2] 栾春娟,侯海燕. 创新研究国际前沿的可视化分析[J]. 科技与管理,2009,11(1):28-30.
- [3] Tamotsu Kamigaki, et al. An object-oriented visual model-building and simulation system for FMS control[J]. Simulation,1996,67(6):149-154.
- [4] 钟登华,宋洋. 大型水利工程三维可视化仿真方法研究[J]. 计算机辅助设计与图形学学报,2004,16(1).
- [5] 肖丽雯,何援军,秦鹏飞. 参数化图库建库工具的开发及应用[J]. 计算机辅助设计与图形学学报,2001,13(5).
- [6] 张晋西. Visual Basic 与 AutoCAD 二次开发[M]. 北京:清华大学出版社,2004.
- [7] 张杨. 溪洛渡大坝混凝土施工方案仿真分析[J]. 人民长江,2009,40(1).
- [8] 刘东海. 工程可视化辅助设计理论方法及其应用[D]. 天津:天津大学,2003.

(编辑:郑毅)

Research and application of simulation visualization of concrete arch dam construction

YAN Qiao, FU Yanyan, ZHANG Zhao, LI Chengyu

(College of Hydraulic & Environmental Engineering, China Three Gorges University, Yichang 443002, China)

Abstract: The application of simulation technology provides an effective tool for studying the construction control of large-scaled hydropower projects. Based on Visual Studio platform, a construction simulation system is developed by an incorporation of dynamic simulation technology for construction process, computer simulation technology and Access database. Then the 3D dynamic display of concrete placement process of an arch dam is realized by secondary development of AutoCAD with VB. The system was applied in Xiluodu hydropower project and its main functions and effects were presented. By simulating the construction process and analyzing the simulation results, the proposed system can provide scientific bases for rational arrangement of construction schedule and optimization of construction organization design.

Key words: construction simulation; 3D visualization; AutoCAD secondary development; concrete arch dam

(上接第 49 页)

Study on simulation similarity of chloride ion penetration into concrete

GAO Yanhong¹, ZHUANG Huaxia¹, LI Xizong², WU Yaling¹, LIU Rutai¹

(1. College of Civil Engineering and Architecture, Zhejiang University of Technology, Hangzhou 310014, China; 2. Administration Office of Wen-rui-tang River System, Wenzhou 325000, China)

Abstract: On the basis of a sluice in typical marine environment at Oujiang River estuary in Wenzhou City, the chloride penetration parameters of sluice pier concrete that is located at a tidal ranges are analyzed and further compared with the results obtained in artificial climatic environment, so that the similarity of chloride ion penetration into concrete under artificial climatic environment is studied. Based on the measured chloride concentrations in the different depths of the concrete, the thicknesses of convection region and the peak values of chloride concentration in the concrete are analyzed, and the diffusion coefficients are calculated. The similarity of main parameters under the natural marine environment and artificial climatic environment are compared and studied. The analysis results show that some main parameters, especially thicknesses of convection region and diffusion coefficients, under simulation environment have similar law with that under natural marine environment.

Key words: chloride ion; simulation experiment; similarity; hydraulic concrete; marine environment